

MAȘINI ELECTRICE

Curs 2: Noțiuni introductive (Continuare)

Prof.dr.ing. Claudia MARȚIȘ
Catedra de Mașini Electrice, Marketing și Management
Facultatea de Inginerie Electrică

MĂRIMI ȘI LEGI DE BAZĂ ALE ELECTROTEHNICII APLICATE MAȘINILOR ELECTRICE

MĂRIMI DE STARE ELECTRICĂ ȘI MAGNETICĂ

Sarcina electrică, q : caracterizează starea de încărcare a corpurilor

Momentul electric, \mathbf{p} : caracterizează starea de polarizare electrică (\mathbf{P}) a corpurilor

Densitatea curentului de conducție, \mathbf{J} : caracterizează starea electrocinetică a corpurilor

Momentul magnetic, \mathbf{m} : caracterizează starea de magnetizație (\mathbf{M}) a corpurilor

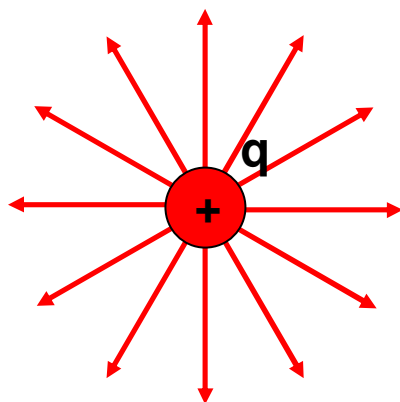
$$q = \iiint_V \rho_v dv \quad \bar{p} = \iiint_V \bar{P} dv \quad i = \iint_S \bar{J} d\bar{S} \quad \bar{m} = \iiint_V \bar{M} dV$$




Observație_1. Consultați bibliografia recomandată la finalul cursului.

Observație_2. Mărimile scrise cu roșu reprezintă mărimi vectoriale.

Un **câmp electric** se definește ca starea unei regiuni a spațiului manifestată prin proprietatea că un mic corp încărcat electric(q_0) plasat în această regiune este supus acțiunii unei forțe care nu s-ar exercita dacă acest corp nu ar fi încărcat.

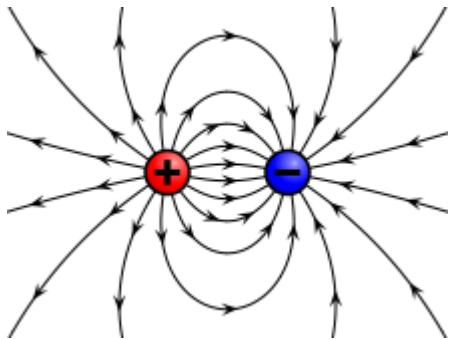


 $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} \longrightarrow E = \frac{F}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$

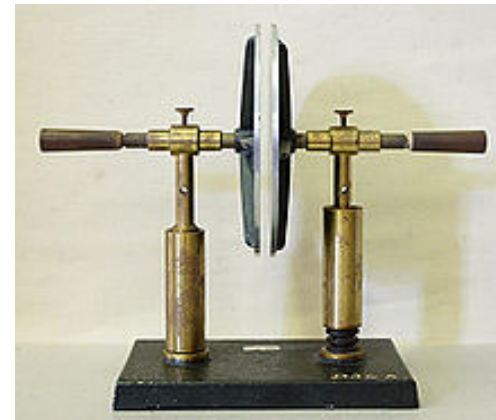
Aplicația 1. Valoarea intensității câmpului electric în diferite puncte pe dreapta ce unește două sarcini electrice $q_1 > 0$, $q_2 > q_1$.

CÂMP ELECTRIC





Câmpurile electrice a două sarcini punctiforme



Câmp electric creat între două plăci metalice paralele între care se aplică o tensiune

Potențialul electric într-un punct (M) reprezintă mărimea fizică scalară egală cu raportul dintre lucrul mecanic efectuat de forțele câmpului la deplasarea unui corp cu sarcina de 1C, din acel punct până într-un punct de referință, foarte depărtat de sursa de câmp.

$$V_M = \frac{L_{M \rightarrow \infty}}{q_0} \quad \longrightarrow \quad V_M = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$$

Aplicația 2. Valoarea intensității câmpului electric și a potențialului electric într-un punct oarecare de pe axa de simetrie a unui disc subțire de rază a , uniform încărcat cu densitatea de suprafață ρ_s . A sarcinii electrice, discul fiind situat în vid.

LEGI GENERALE ȘI DE MATERIAL ALE CÂMPULUI ELECTRIC

Legea legăturii dintre inducție,
intensitate și polarizație în
câmpul electric:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

Legea polarizației temporare:

$$\vec{P}_t = \epsilon_0 \bar{\chi}_e \vec{E}$$

$$\vec{D} = \bar{\epsilon} \vec{E} + \vec{P}_p$$

D, E

Inducția electrică, respectiv **intensitatea câmpului electric** în corpuri;

P_t, P_p

Polarizația temporară, respectiv permanentă

ε₀,

permitivitatea vidului,

ε

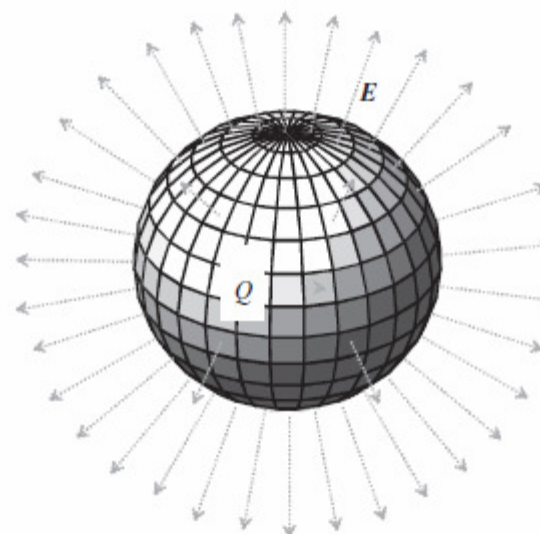
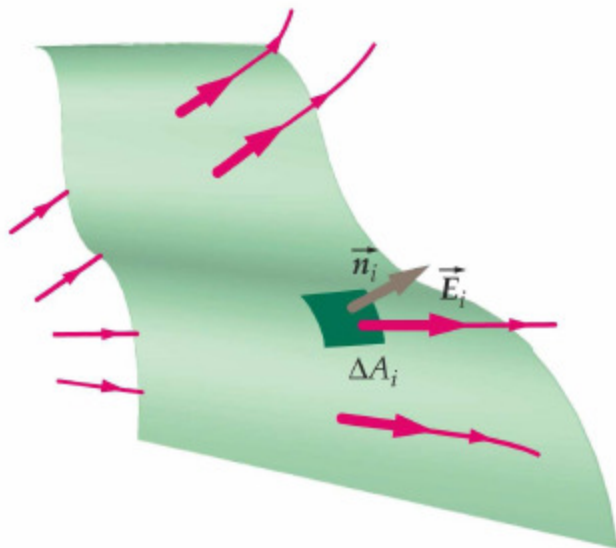
permitivitatea unui mediu oarecare, cu polarizația temporară

χ_e

susceptivitate electrică

Aplicația 3. Calculați inducția electrică într-un strat de izolație de grosime $d=0.3\text{mm}$ când potențialul înfășurării este 400V și miezul pe care se află înfășurarea se află la potențialul pământului. Permitivitatea relativă a materialului de izolație este $\epsilon_r=3$ ($\epsilon_0=8.854 \times 10^{-12} \text{ As/Vm}$).

Flux electric $\Psi_e = \int_S \vec{E} d\vec{A} \quad [Nm^2 / C]$

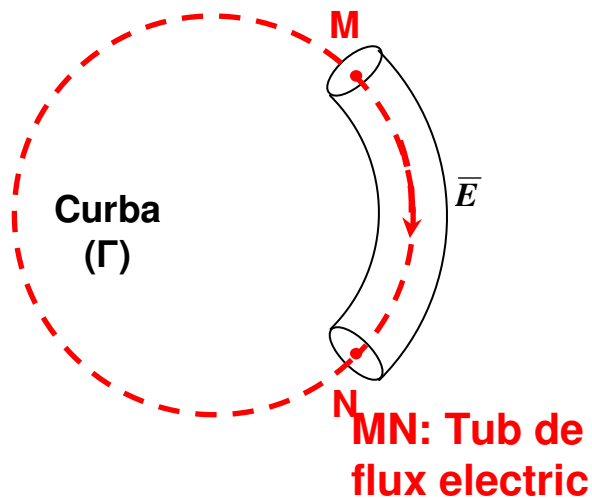


Legea fluxului electric (Gauss): Fluxul electric $\Psi_{e\Sigma}$ printr-o suprafață închisă oarecare Σ este egal cu sarcina totală $q_{v\Sigma}$ din volumul v_Σ , mărginit de această suprafață.

$$\Psi_{e\Sigma} = q_{v\Sigma} \quad \text{sau} \quad \int_{\Sigma} \vec{D} d\vec{A} = q_{v\Sigma}$$

Tensiune electrică

$$U_{MN(c)} = \int_{MN(\Gamma)} \vec{E} d\vec{l} = V_N - V_M$$



Legea conducției electrice (legea lui Ohm):
Densitatea locală și instantanee \vec{J} a curentului electric de conducție care trece printr-un corp este egală cu produsul dintre conductivitatea corpului și intensitatea locală și instantanee a câmpului electric în sens larg, care este egală cu suma dintre intensitățile locale și instantanee ale câmpurilor electric \vec{E} și electric imprimat \vec{E}_i .

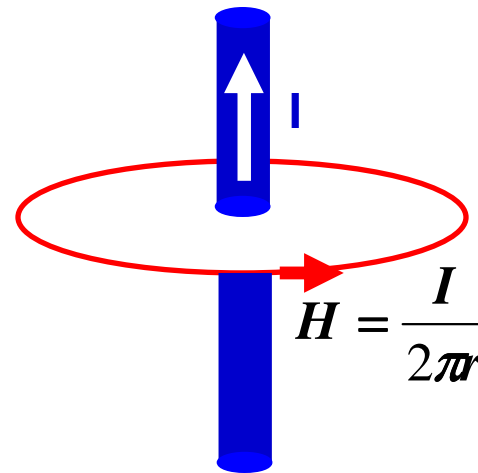
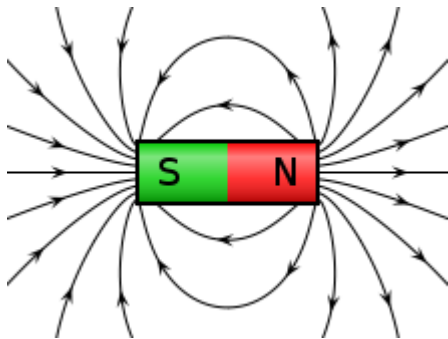
$$\vec{J} = \vec{\sigma}(\vec{E} + \vec{E}_i)$$

Legea de conservare a sarcinii electrice:
Intensitatea instantanee a curentului electric de conducție i_Σ , care iese din orice suprafață închisă Σ , este egală cu viteza instantanee de scădere în timp a sarcinii electrice q_Σ din interiorul suprafeței presupuse antrenată de corpuri în mișcarea lor.

$$i_\Sigma = -\frac{dq_\Sigma}{dt}$$

Un **câmp magnetic** este un câmp de forțe care apare datorită:

- ❑ Prezenței unor magneți permanenți
- ❑ Parcurgerii unui circuit electric de către un curent electric
- ❑ Deplasării unor sarcini electrice



CÂMP MAGNETIC



LEGI GENERALE ȘI DE MATERIAL ALE CÂMPULUI MAGNETIC

Legea legăturii dintre inducție,
intensitate și magnetizație în
câmpul magnetic:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$$

Legea polarizației temporare:

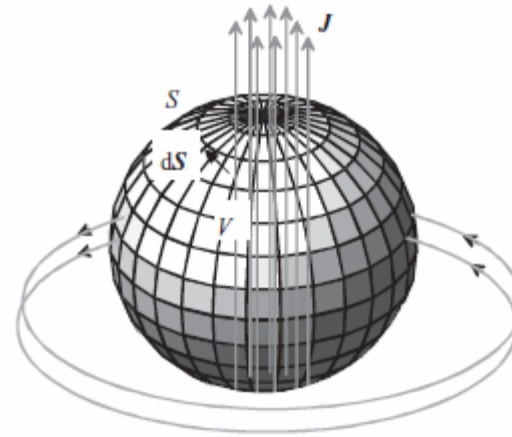
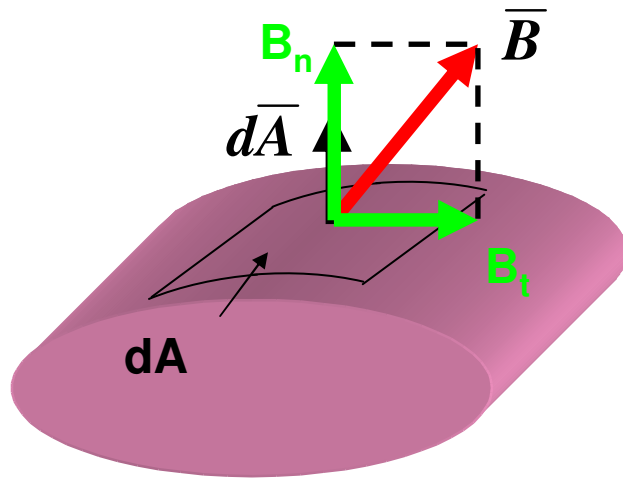
$$\vec{M}_t = \bar{\chi}_m \vec{H}$$

$$\vec{B} = \bar{\mu} \vec{H} + \mu_0 \vec{M}_p$$

B, H	Inducția magnetică , respectiv intensitatea câmpului magnetic în corpuri;
M_t, M_p	Magnetizația temporară, respectiv permanentă
μ₀, μ	permeabilitatea vidului, permeabilitatea unui mediu oarecare, cu magnetizație temporară
χ_m	susceptivitate magnetică

Aplicația 4. Să se calculeze inducția magnetică în punctele situate pe axa de simetrie a unei bobine de grosime neglijabilă, lungime l, rază a, cu N spire și parcursă de curentul i. Mediul în care se găsește bobina are permeabilitatea μ.

Flux magnetic $\Psi_m = \int_S \vec{B} d\vec{A} \quad [Wb]$



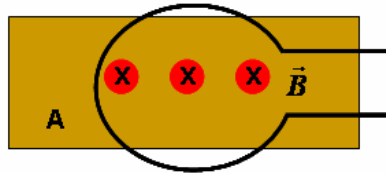
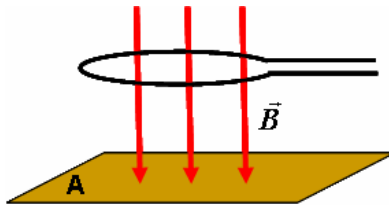
Legea fluxului magnetic (Gauss): Fluxul electric $\Psi_{m\Sigma}$ printr-o suprafață închisă oarecare Σ este nul.

$$\Psi_{m\Sigma} = 0 \quad \text{sau} \quad \int_{\Sigma} \vec{B} d\vec{A} = 0$$

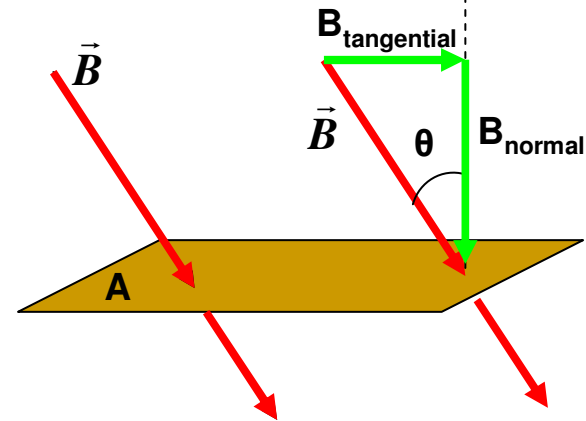
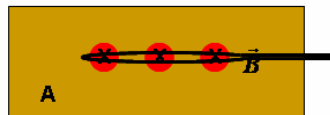
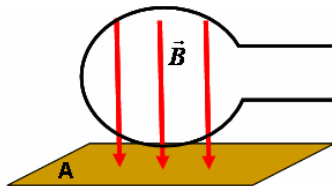
Fluxul ce traversează suprafața A este dat de:

$$\Phi = BA \cos(\theta)$$

Bobina este paralelă cu planul A, deci câmpul magnetic o traversează perpendicular, deci fluxul magnetic ce străbate bobina este maxim.

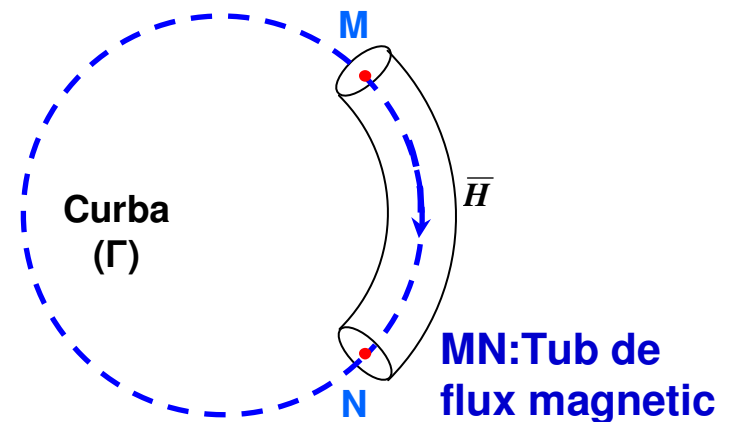


Bobina este perpendiculară pe planul A, deci câmpul magnetic este paralel cu planul bobinei, deci fluxul magnetic ce străbate bobina este 0.

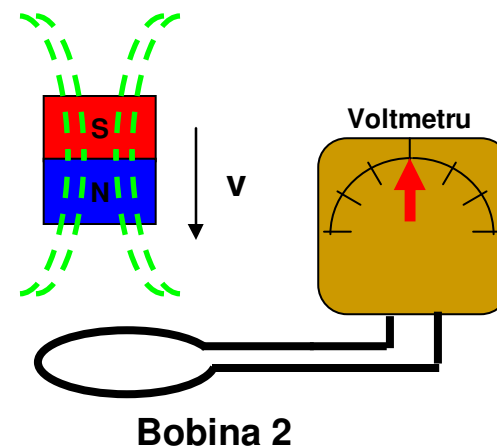
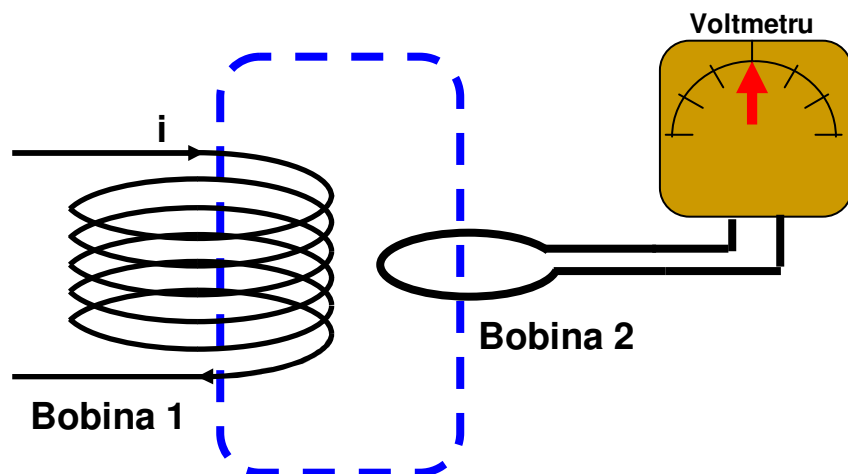


Tensiune magnetică

$$U_{mMN(c)} = \int_{MN(\Gamma)} \vec{H} d\vec{l}$$



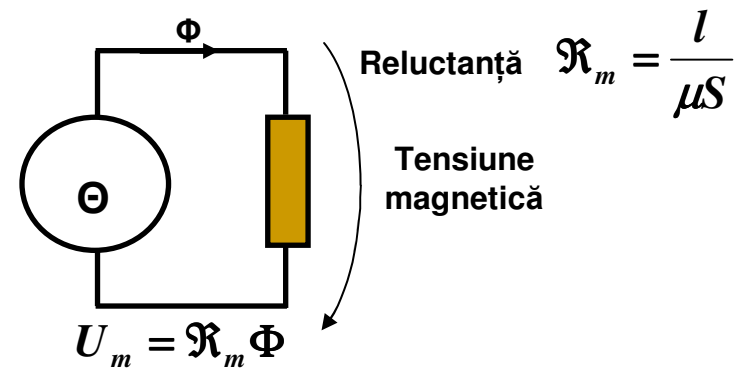
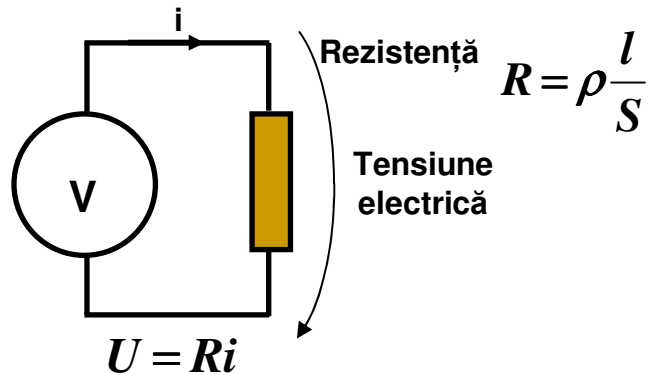
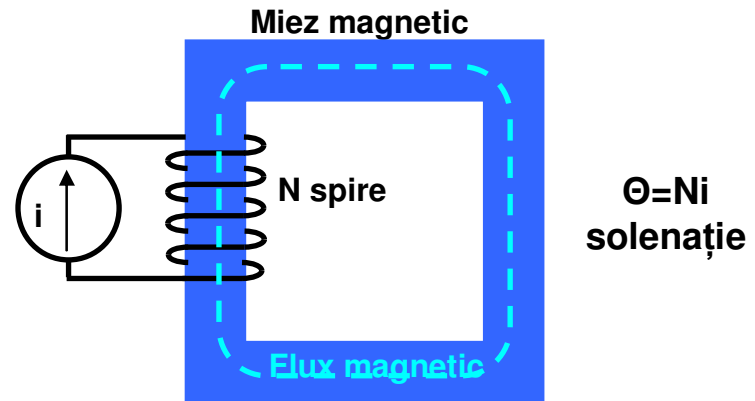
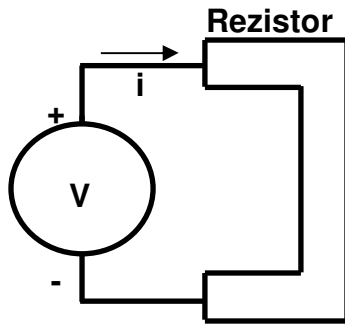
Fluxul determinat de bobina 1 care înlănțuie bobina 2 (formată dintr-o singură spirală)



Legea inducției electromagnetice (Faraday): Tensiunea electrică de-a lungul unei curbe închise Γ (bobina 2) este egală cu viteza de scădere în timp a fluxului magnetic printr-o suprafață S care se sprijină pe curba Γ .

$$u_{\Gamma} = \oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_{S_{\Gamma}} \vec{B} d\vec{A} = -\frac{d\Psi_{mS_{\Gamma}}}{dt}$$

Circuite electrice/Circuite magnetice



CIRCUITE ELECTRICE

CIRCUITE MAGNETICE

Intensitatea câmpului

$$\bar{E}$$

$$\bar{H}$$

Vector caracteristic

$$\bar{J}$$

$$\bar{B}$$

Lege de material specifică

$$\bar{J} = \sigma \bar{E} = \frac{1}{\rho} \bar{E}$$

$$\bar{B} = \mu \bar{H}$$

Coeficient de material

σ - conductivitate

μ - permeabilitate

Legea conservării

$$\text{div} \bar{J} = 0$$

$$\text{div} \bar{B} = 0$$

Mărime tip debit

$$i = \iint_S \bar{J} d\bar{S}$$

$$\Phi = \iint_S \bar{B} d\bar{S}$$

Tensiune

$$u = \oint \bar{E} d\bar{l}$$

$$u_m = \oint \bar{H} d\bar{l}$$

Element de circuit

Rezistență $R = \int_C \frac{dl}{\sigma S}$

Reluctanță $R = \int_C \frac{dl}{\mu S}$

Legea lui Ohm

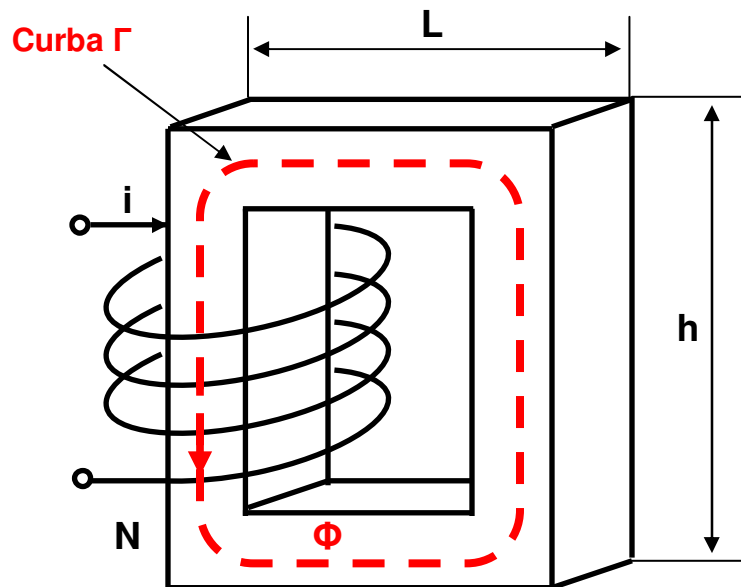
$$u = Ri$$

$$u_m = R\Phi$$

Legea circuitului magnetic (Ampere): Tensiunea magnetică de-a lungul unei curbe închise Γ este egală cu suma dintre intensitatea curentului de conducție printr-o suprafață S care se sprijină pe curba Γ și viteza de creștere în timp a fluxului electric prin S (curent de deplasare sau curent herțian).

$$u_{m\Gamma} = \oint_{\Gamma} \vec{H} d\vec{l} = \int_{S_{\Gamma}} \vec{J} d\vec{A} + \frac{d}{dt} \int_{S_{\Gamma}} \vec{D} d\vec{A} = i_{S_{\Gamma}} + \frac{d\Psi_{eS_{\Gamma}}}{dt}$$

Aplicația 5. Calculați curentul de deplasare în izolația înfășurării de la aplicația 3, la 50 Hz și pentru o suprafață a izolației de 0.01 m^2 .



$$\oint_{\Gamma} \vec{H} d\vec{l} = H(2L + 2h) \quad \int_{S_{\Gamma}} \vec{J} d\vec{A} + \frac{d}{dt} \int_{S_{\Gamma}} \vec{D} d\vec{A} = Ni$$

$$H = \frac{Ni}{(2L + 2h)}$$

Fluxul care parcurge circuitul rezultă:

$$\Phi = BS_{\Gamma} = \mu HS = \frac{Ni}{\frac{2L + 2h}{\mu S}} = \frac{\Theta}{\Re_{m\Gamma}}$$

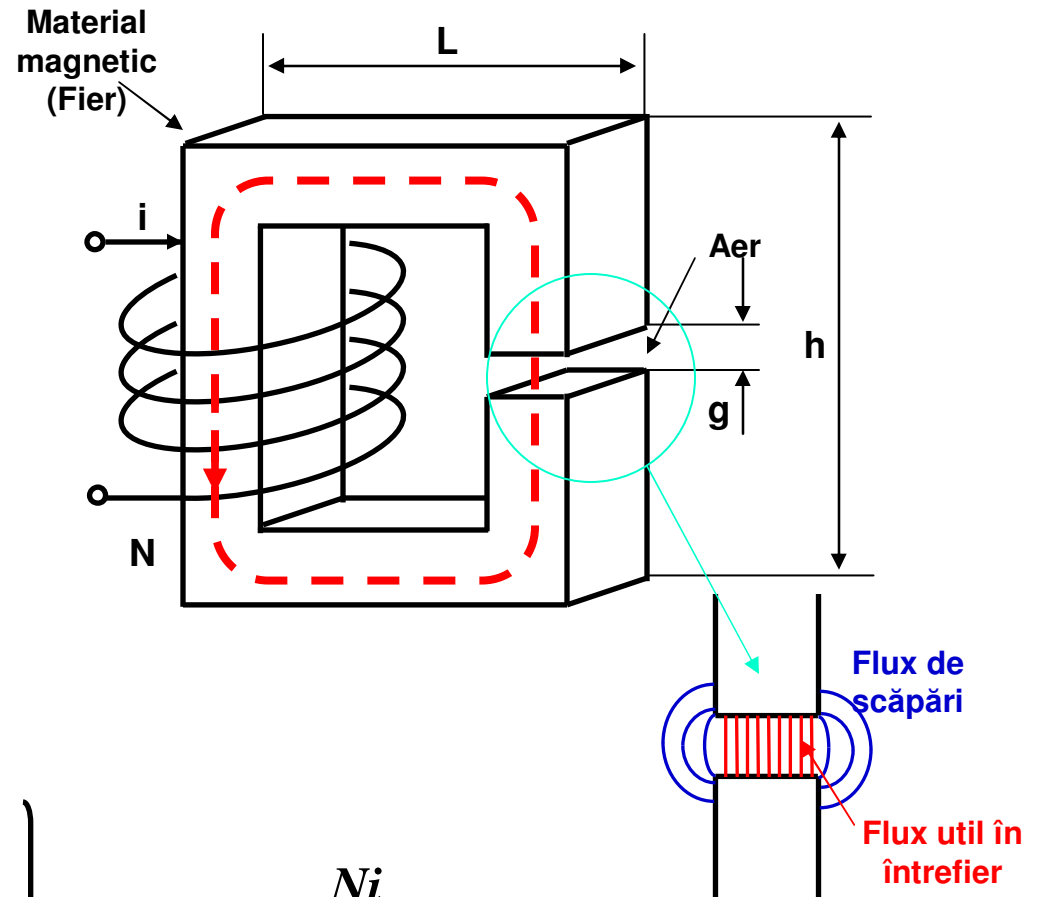
Pentru un circuit magnetic cu întrefier:

$$H_{Fier} l_{Fier} + H_{aer} l_{aer} = Ni$$

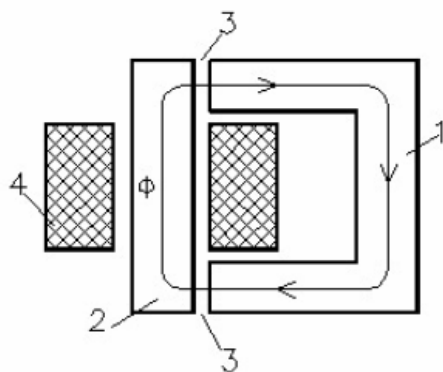
$$\Phi_{Fier} = \Phi_{aer} = \Phi$$

$$\left. \begin{aligned} H_{Fier} l_{Fier} &= \frac{B}{\mu_{Fier}} l_{Fier} = \Phi \frac{l_{Fier}}{\mu_{Fier} S} = \Phi \mathcal{R}_{mFier} \\ H_{aer} l_{aer} &= \frac{B}{\mu_{aer}} l_{aer} = \Phi \frac{l_{aer}}{\mu_{aer} S} = \Phi \mathcal{R}_{maer} \end{aligned} \right\}$$

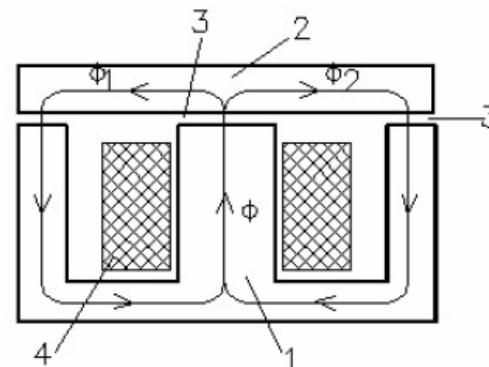
$$\Phi = \frac{Ni}{\mathcal{R}_{mFier} + \mathcal{R}_{maer}}$$



Circuit magnetic neramificat

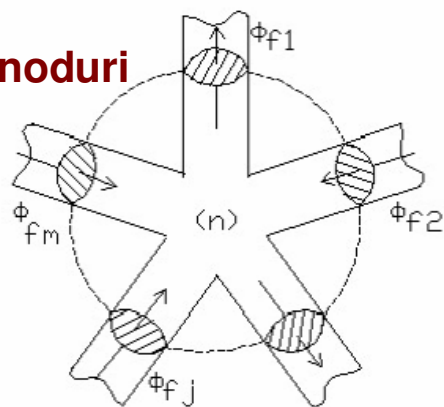


Circuit magnetic neramificat



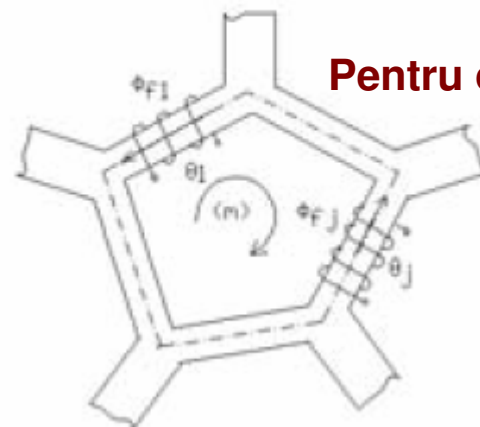
Teoremele lui Kirchhoff pentru circuite magnetice

Pentru noduri



$$\sum_{k=1}^n \Phi_{fk} = 0$$

Pentru ochiuri

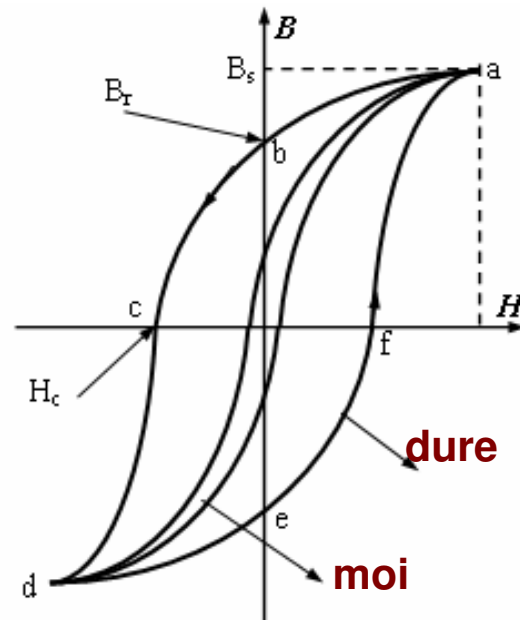


$$\sum_{k=1}^n \mathfrak{R}_{mk} \Phi_{fk} = \sum_{k=1}^n \Theta_k$$

Materiale magnetice: sunt materiale feromagnetice utilizate la realizarea circuitelor magnetice.

Materialele magnetice moi sunt materiale care se magnetizează și se demagnetizează ușor, având ciclu de histerezis îngust și câmp coercitiv mic ($\approx 80\text{A/cm}$)

Materialele magnetice dure sunt materiale cu ciclu de histerezis larg, cu câmp coercitiv mare ($\approx 4000\text{A/cm}$), care se magnetizează și se demagnetizează greu



Curbele de histerezis care definesc cele două tipuri de materiale feromagnetice

Materiale magnetice moi

Materialul	Permeabilitatea relativă		Inducție remanentă B_r Wb/m ²	Câmp coercitiv H_c A/m
	Inițială	Maximă		
Fier pur (tratat cu hidrogen)	25000	250000	1,4	4
Tablă silicioasă (4% Si)	500	7000	1,8	40
Permalloy (78,5%Ni; 21,5%Fe)	10000	50000	0,6	4
Supermalloy (79%Ni; 15%Fe; 5%Mo; 5%Mn)	100000	300000	0,6	0,4
Ferită de mangan și zinc	2000	3000	0,15	10

Materiale magnetice dure

Materialul	Permeabilitatea relativă inițială	Inducție remanentă B_r Wb/m ²	Câmp coercitiv H_c Asp/m
Oțel (cu 1%C)	40	0,7	5000
Oțel crom, Oțel wolfram	30	1,1	5000
Alnico I (12%Al; 20%Ni; 5%Co; 63%Fe)	4	0,73	34000
Oerstit 900 (20%Ni; 30%Co; 20%Ti; 30%Fe)	3	0,55	65000
Aliaj Platină-Cobalt (77%Pt; 23%Co)	1	0,45	260000
Ferită de bariu	1	0,2 ... 0,4	100000 ... 250000

Secțiunea coloanei centrale = 10 cm²

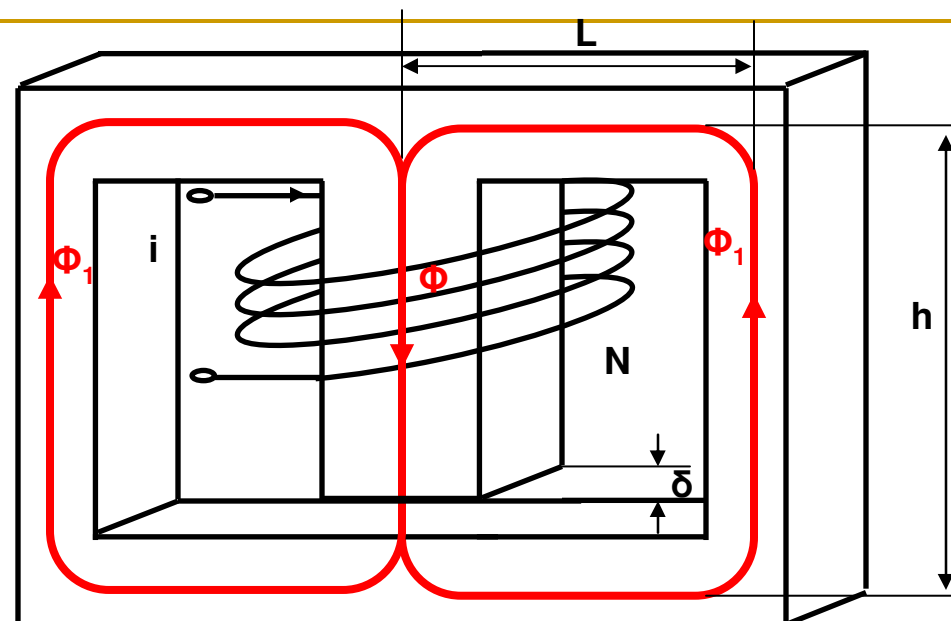
Secțiunea celorlalte părți = 5 cm²

N=500 spire

L = 8 cm

H = 14 cm

Aplicația 6. Să se calculeze curentul necesar prin bobină pentru a produce, la un $\delta=0.2$ mm, un flux de $\Phi=10^{-3}$ Wb, în întrefier. Să se calculeze apoi fluxul rezultat în întrefier pentru $\delta=0$ mm, $\delta=0.6$ mm, $\delta=2.4$ mm. Curba de magnetizare a materialului magnetic al miezului corespunde datelor din tabelul de mai jos.

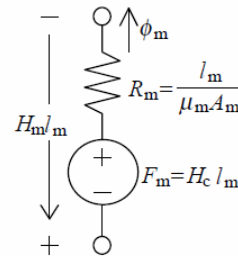
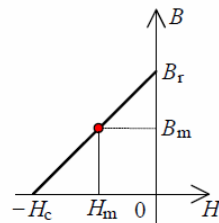
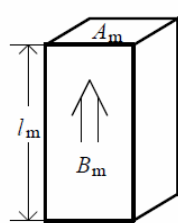
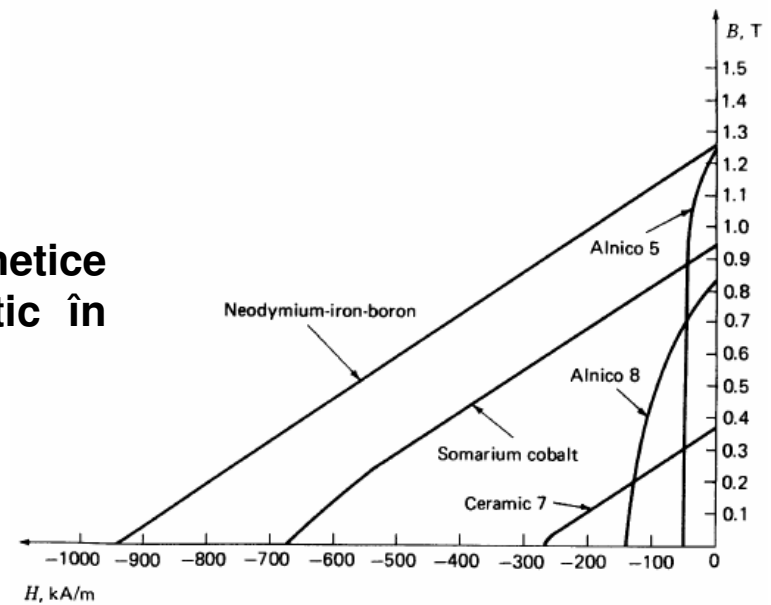


H	[A/m]	100	210	400	500	800	1500	2500
B	[T]	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.3

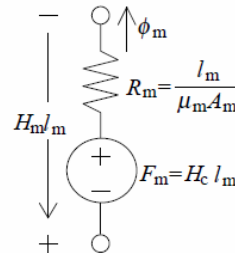
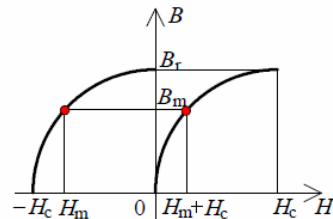
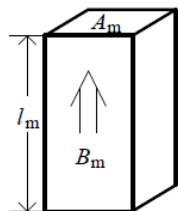
Aplicația 7. Se consideră un circuit magnetic similar cu cel din aplicația 6, la care secțiunea tuturor componentelor circuitului magnetic este aceeași, egală cu 20 cm², W = 100 spire, iar caracteristica $B=f(\theta)$ a materialului pentru $\delta = 0$ este dată în tabel. Să se traseze curba corespunzătoare circuitului rezultat când $\delta = 0.6$ mm, respectiv $\delta = 2.4$ mm.

θ [A]	70	100	133	200	233	300	433	730	1500
B[T]	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6

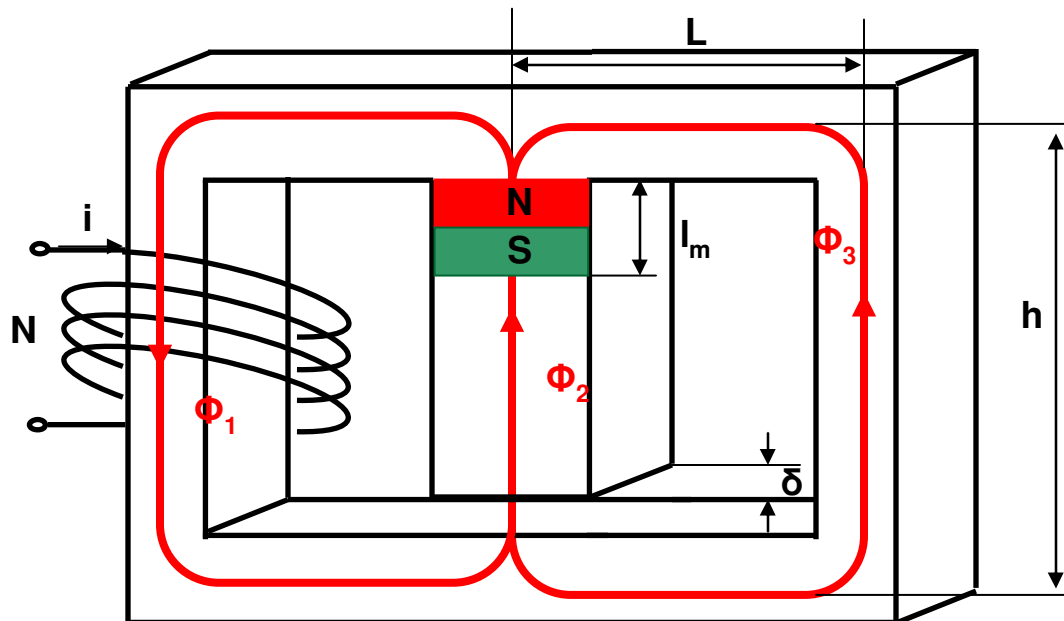
Magneți permanenți: sunt materiale feromagnetice dure utilizate la crearea unui flux magnetic în circuitele magnetice



Modelul de circuit al unui MP cu o caracteristica de demagnetizare liniară: $\mu_m = \text{cst}$

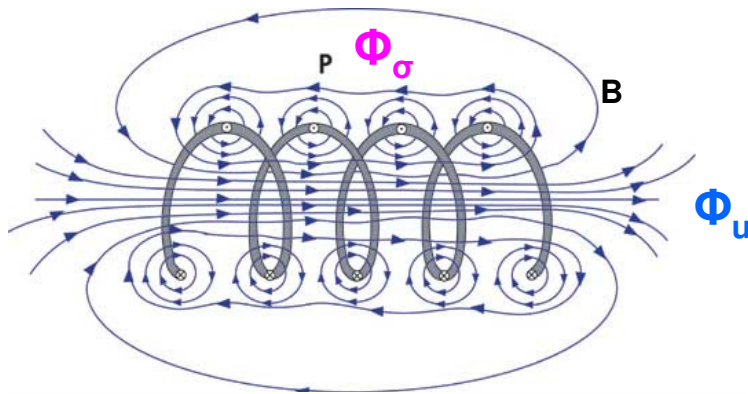


Modelul de circuit al unui MP cu o caracteristica de demagnetizare neliniară: μ_m variabil



Aplicația 8. Să se determine solenația necesară creării unui câmp magnetic în întrefier, de inducție 0.8T, pentru circuitul magnetic din figură, considerând secțiuni egale ale celor trei coloane (10 cm^2), $L = 8 \text{ cm}$, $h = 14 \text{ cm}$, $\delta = 0.2 \text{ mm}$. Magnetul permanent este un magnet de tip NdFeB, cu caracteristică liniară, $B_{\text{rem}} = 1.2 \text{ T}$, $H_c = -868000 \text{ A/m}$. Să se calculeze inducția și în celelalte secțiuni ale circuitului magnetic.

FLUXURI ȘI INDUCTIVITĂȚI ÎN MAȘINI ELECTRICE



$$\Phi = \Phi_u + \Phi_\sigma$$

fluxul magnetic total

fluxul magnetic util

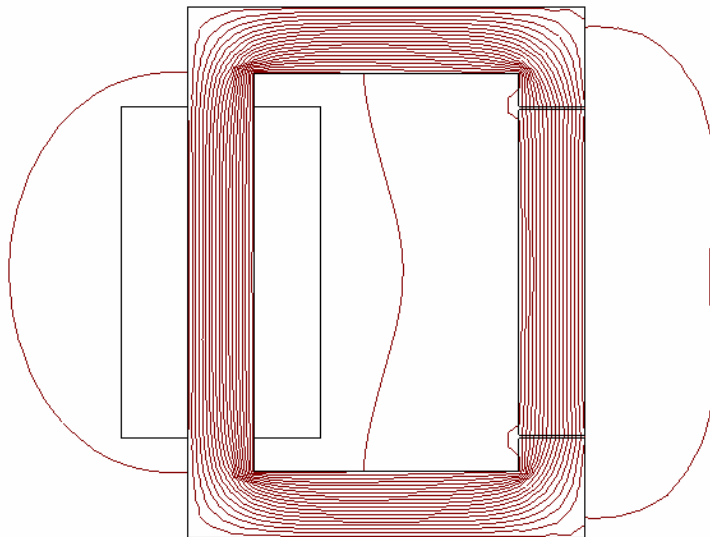
fluxul magnetic de dispersie

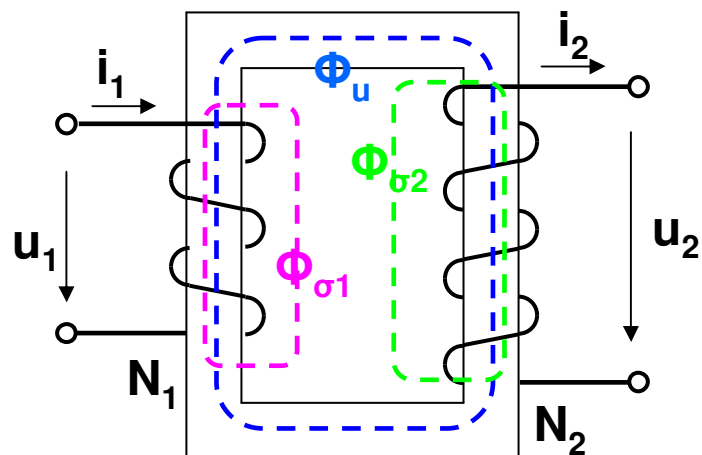
Inductivitate proprie a unei bobine: Raportul dintre fluxul magnetic ce înlănțuie spirele bobinei și curentul care produce acest flux.

$$L = \frac{\Psi}{i} = \frac{N\Phi}{i} = \frac{N(\Phi_u + \Phi_\sigma)}{i} = L_u + L_\sigma$$

Inductivitate proprie utilă

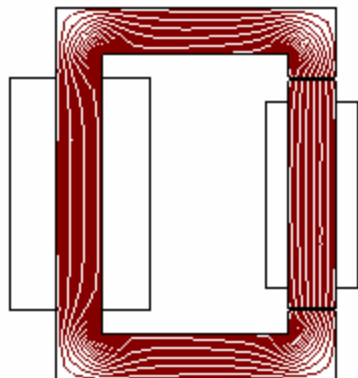
Inductivitate de dispersie





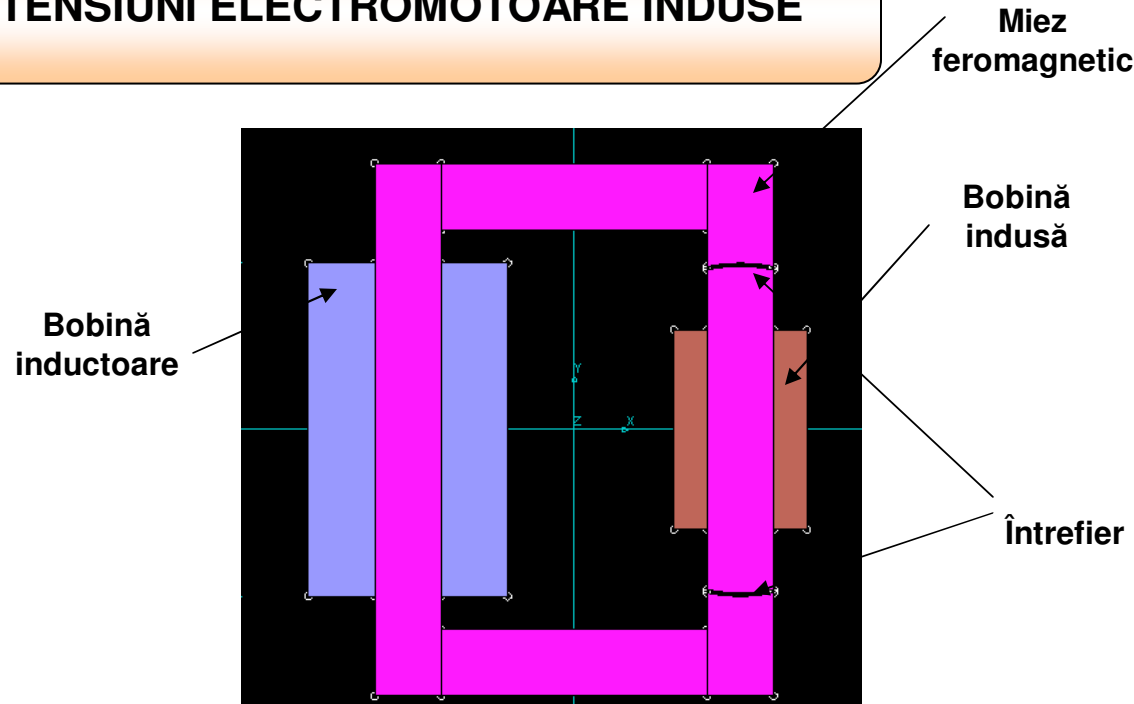
Inductivitate mutuală a bobinei 2 în raport cu bobina 1: Raportul dintre fluxul magnetic produs de curentul ce parcurge bobina 1 și înălțuie spirele bobinei 2 și curentul care produce acest flux.

$$L_{21} = \frac{\Psi_{21}}{i_1} = \frac{N_2 \Phi_u}{i_1}$$



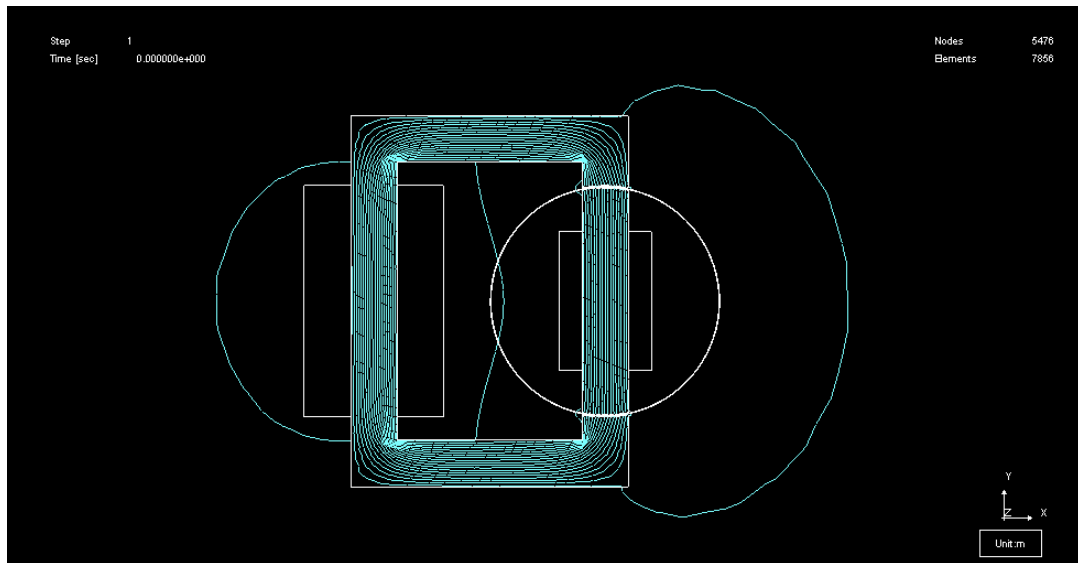
Studiu individual. Demonstrați că $L_{21} = L_{12}$.

TENSIUNI ELECTROMOTOARE INDUSE



Tensiunea electromotoare indusă

$$e_2 = -\frac{d\Psi_2}{dt} = -\frac{d(\Psi_{22} + \Psi_{21})}{dt} = -\frac{d(L_{22}i_2 + L_{21}i_1)}{dt} = \underbrace{-L_{22} \frac{di_2}{dt}}_{\text{T.e.m. de autoinducție}} \underbrace{- L_{21} \frac{di_1}{dt}}_{\text{T.e.m. de inducție mutuală}} \underbrace{- i_1 \frac{dL_{21}}{dt}}_{\text{T.e.m. indusă prin mișcare}}$$



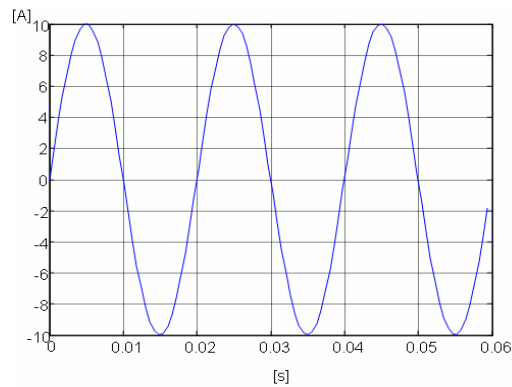
$$i_1 = I_{1max} \sin(\omega t);$$

$$i_2 = 0;$$

$$viteza = 0;$$

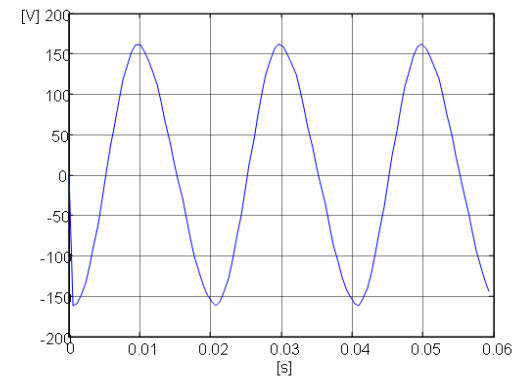
$$L_{22} = cst; L_{21} = cst;$$

$$i_1 = I_{1max} \sin(\omega t)$$

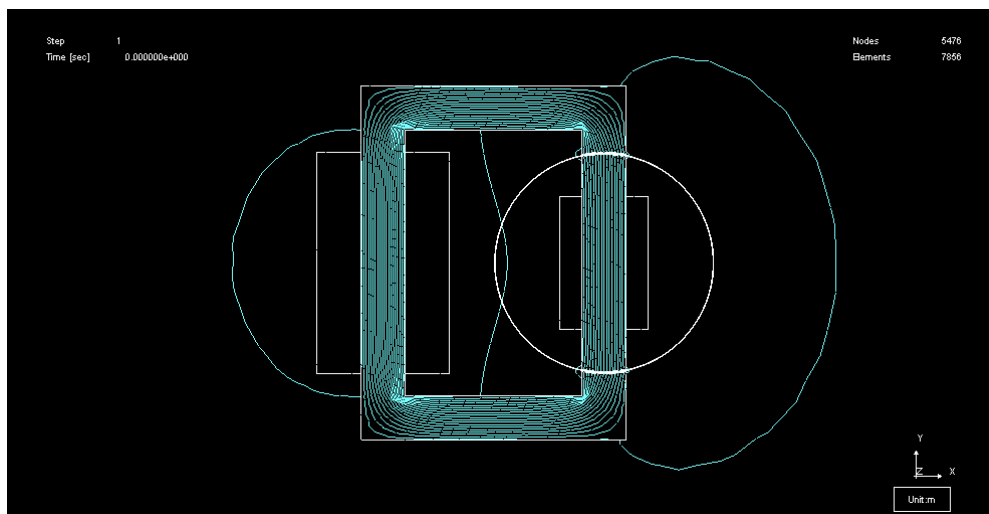


Curent bobina fixă (i_1)

$$e_2 = \omega L_{21} I_{1max} \cos(\omega t)$$



Tensiune indusă în bobina mobilă (e_2)



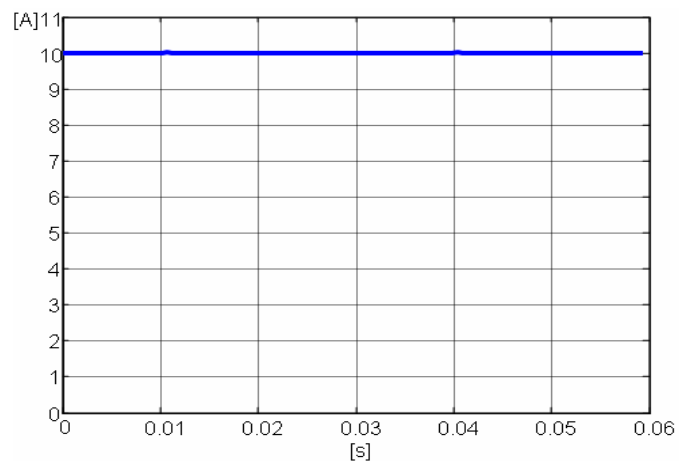
$$i_1 = I_1;$$

$$i_2 = 0;$$

$$viteza = 3000rpm;$$

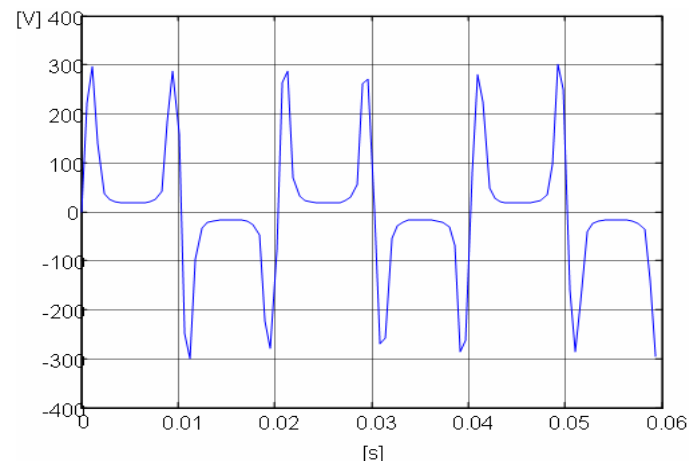
$$L_{22} = cst; L_{21} = L_0(1 + m \cos(2\omega t));$$

$$i_1 = I_1$$



Curent bobina fixă

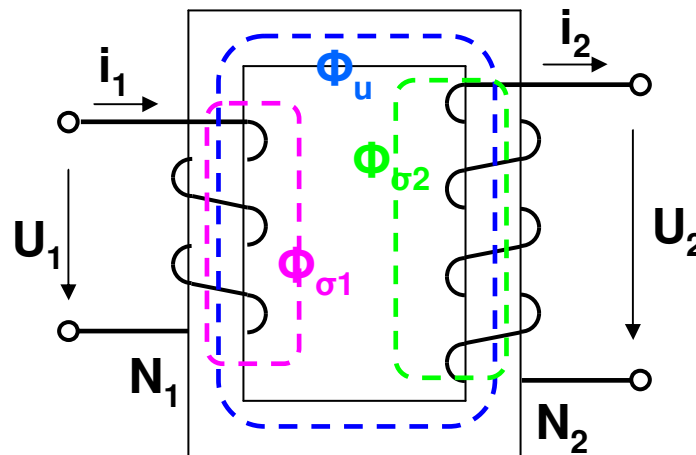
$$e_2 = -2\omega L_0 I_1 \sin(2\omega t)$$



Tensiune indusă în bobina mobilă

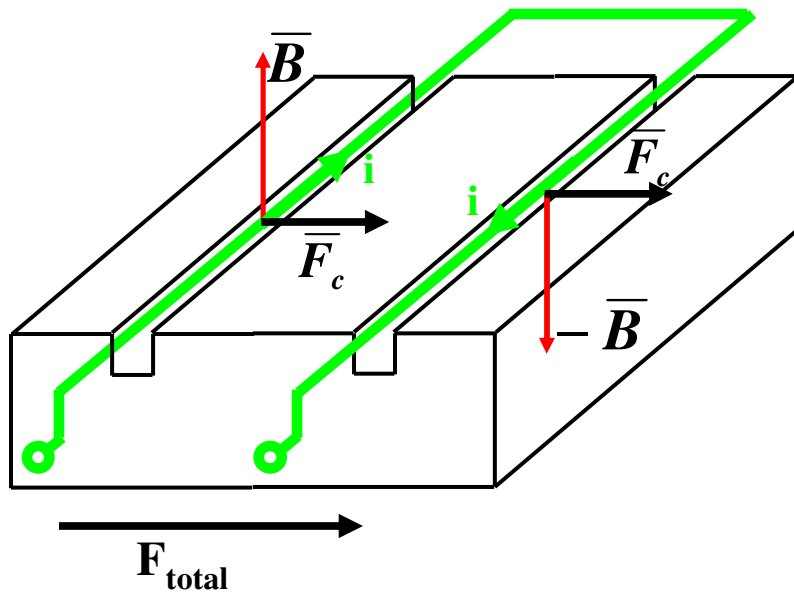
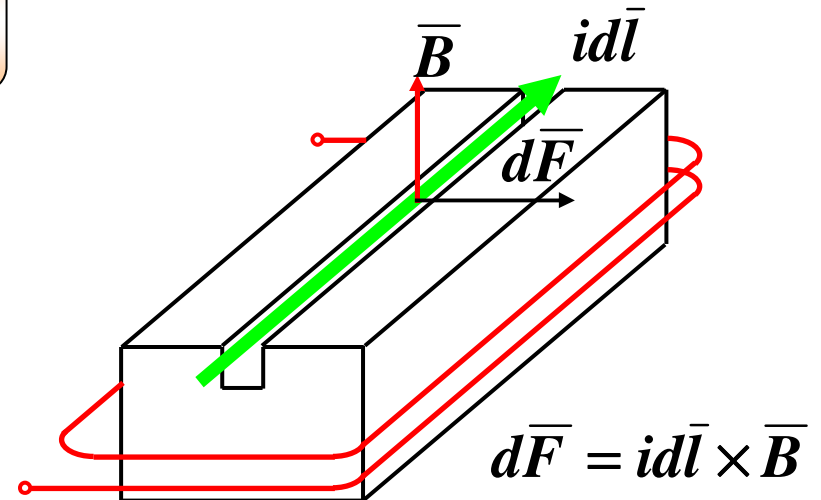
TENSIUNI LA BORNE

$$u_1 = R_1 i_1 + \frac{d\psi_1}{dt} = R_1 i_1 + \frac{d(\psi_{11} + \psi_{12})}{dt} = R_1 i_1 + \frac{d(L_{11}i_1 + L_{12}i_2)}{dt} = R_1 i_1 + \frac{d}{dt} \sum_{i=1}^2 L_{i1} i_i$$



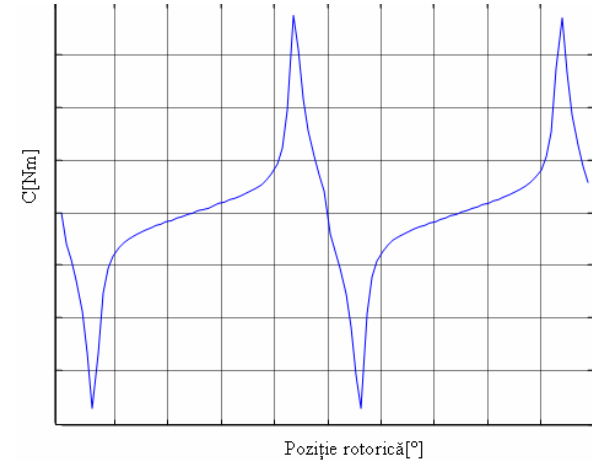
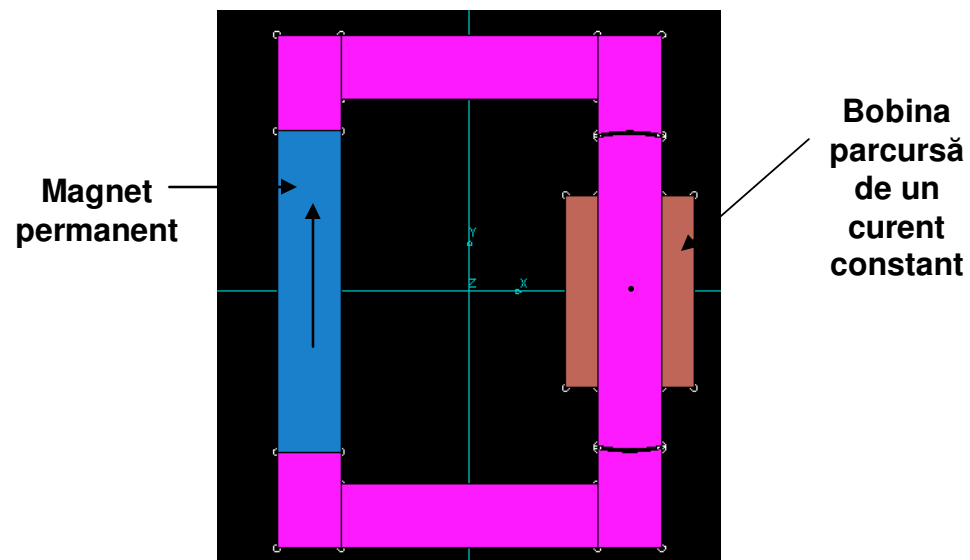
FORȚE ÎN CÂMP MAGNETIC

Forța electromagnetă: Forța care se manifestă asupra unui conductor elementar, parcurs de un curent, aflat într-un câmp magnetic

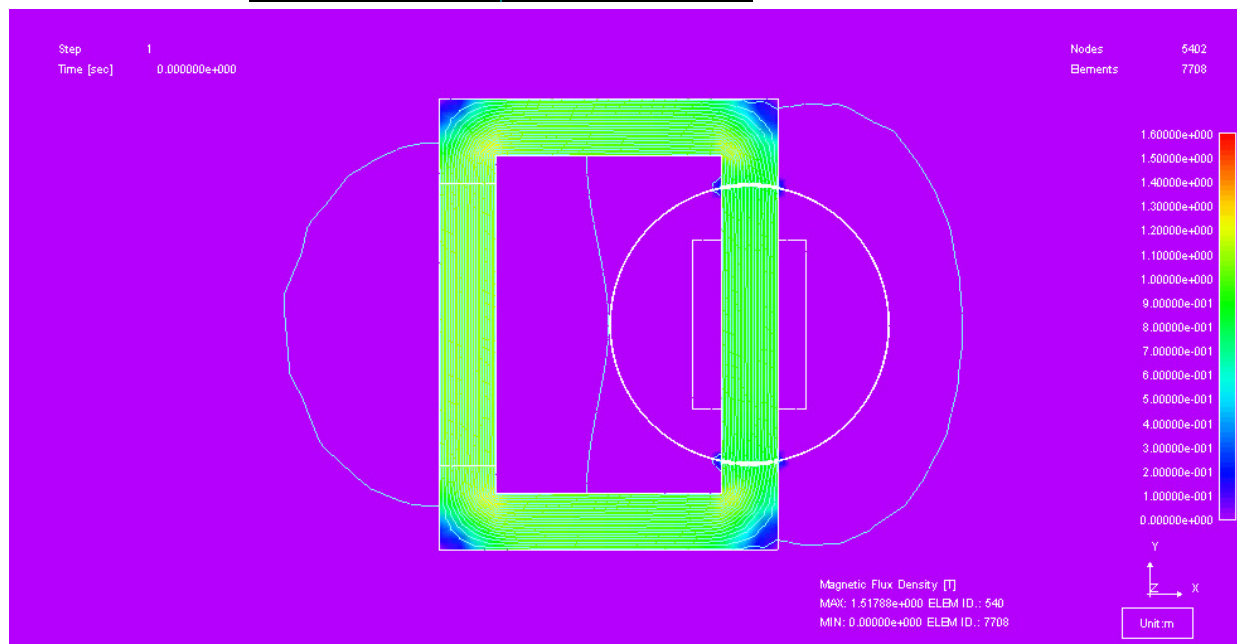


Pentru N conductoare aflate pe o armatură

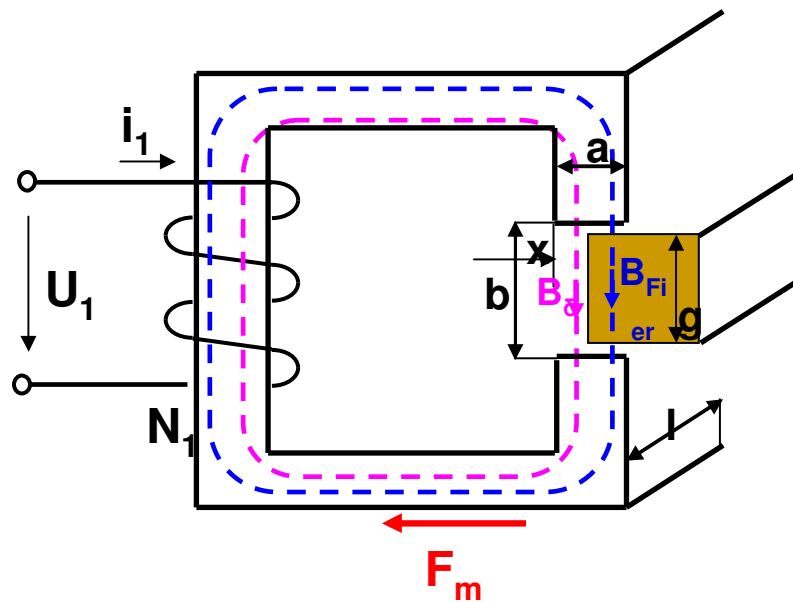
$$F_{total} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_{ci}$$



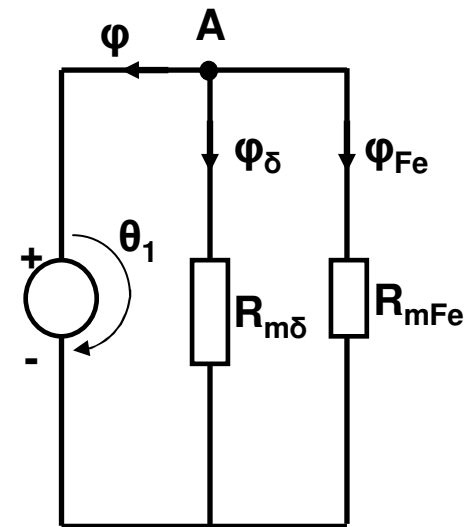
Variația cuplului electromagnetic în funcție de poziția rotorică



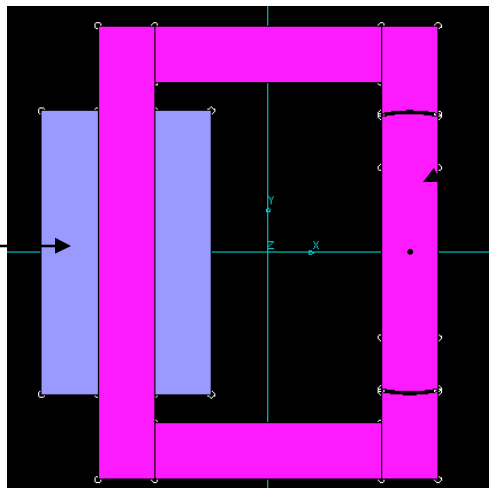
Forța în câmp magnetic : Forța care se exercită asupra unui mediu anizotrop, de către un câmp magnetic produs de o bobină alimentată.



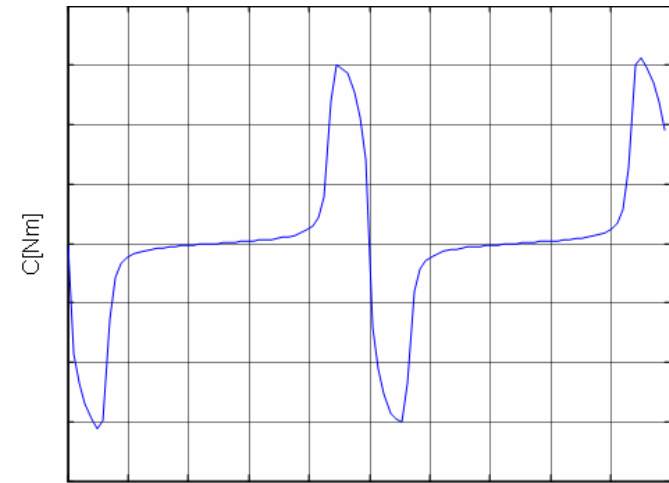
$$F_m = \frac{1}{2} \frac{(N_1 I_1)^2 \mu_0 l}{b} \frac{g}{b - g}$$



**Bobină
parcursă
de un
curent
constant**

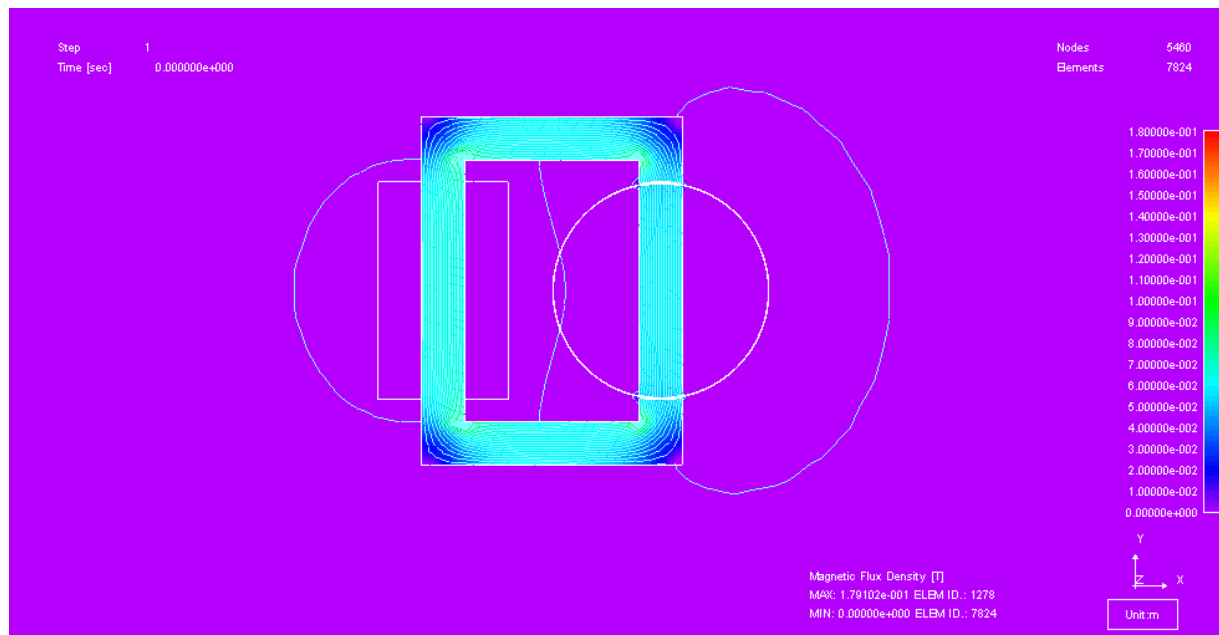


**Miez
feromagnetic
rotativ**



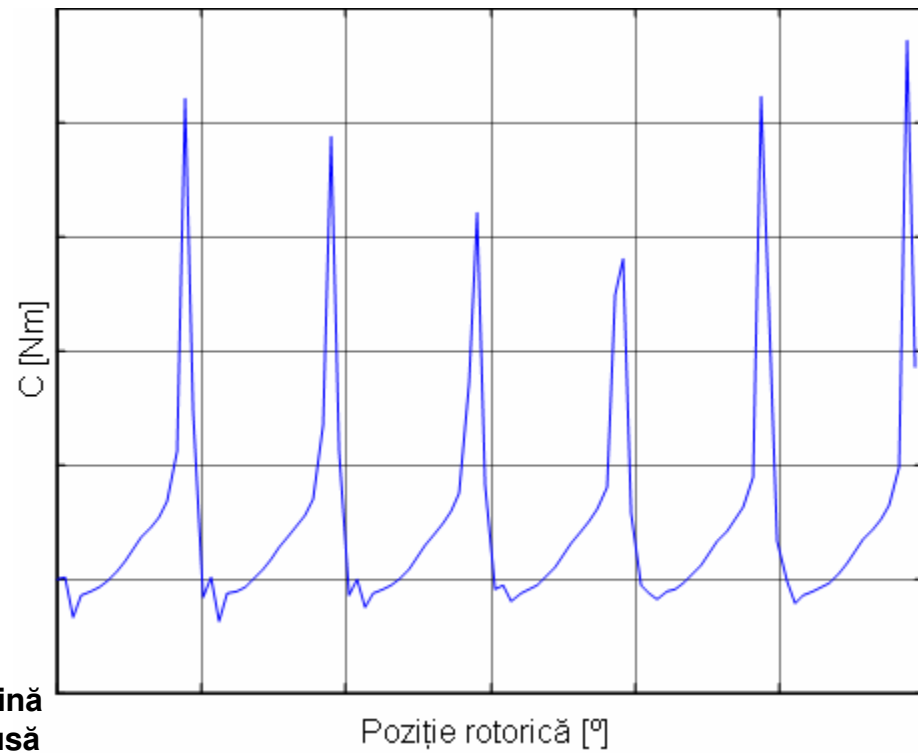
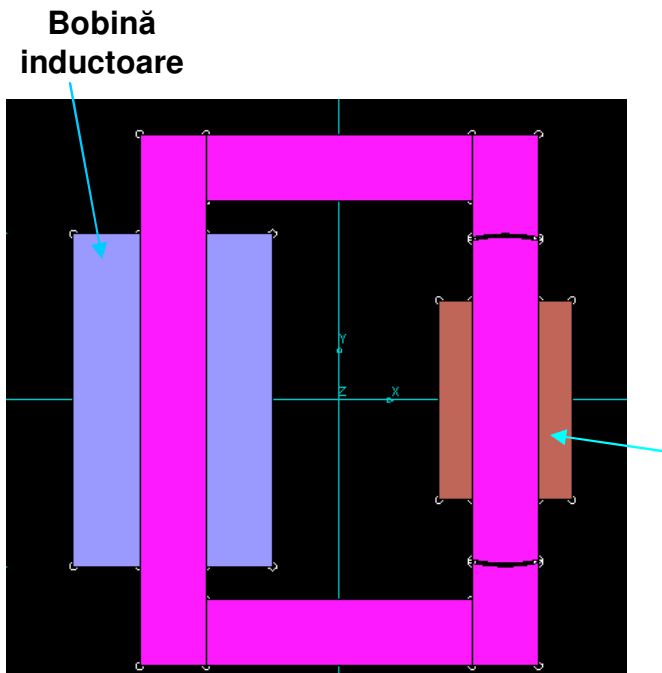
Poziția rotorică [°]

**Variația cuplului
electromagnetic în funcție
de poziția rotorică**



Forța electrodinamică : Forța care apare datorită discontinuității câmpului magnetic ce se manifestă în spațiul (considerat aer sau vid) care cuprinde două conductoare paralele (pe lungimea l), infinit lungi, parcurse de curenții I_1 și I_2 , situate la distanța d unul față de altul.

$$F_m = \mu_0 \frac{I_1 I_2 l}{2\pi d}$$



Variația cuplului electromagnetic în funcție de poziția rotorică

ELEMENTE CONSTRUCTIVE DE BAZĂ ALE MAȘINILOR ELECTRICE

❑ Din punct de vedere cinematic:

➤ La transformator (ambele fixe)

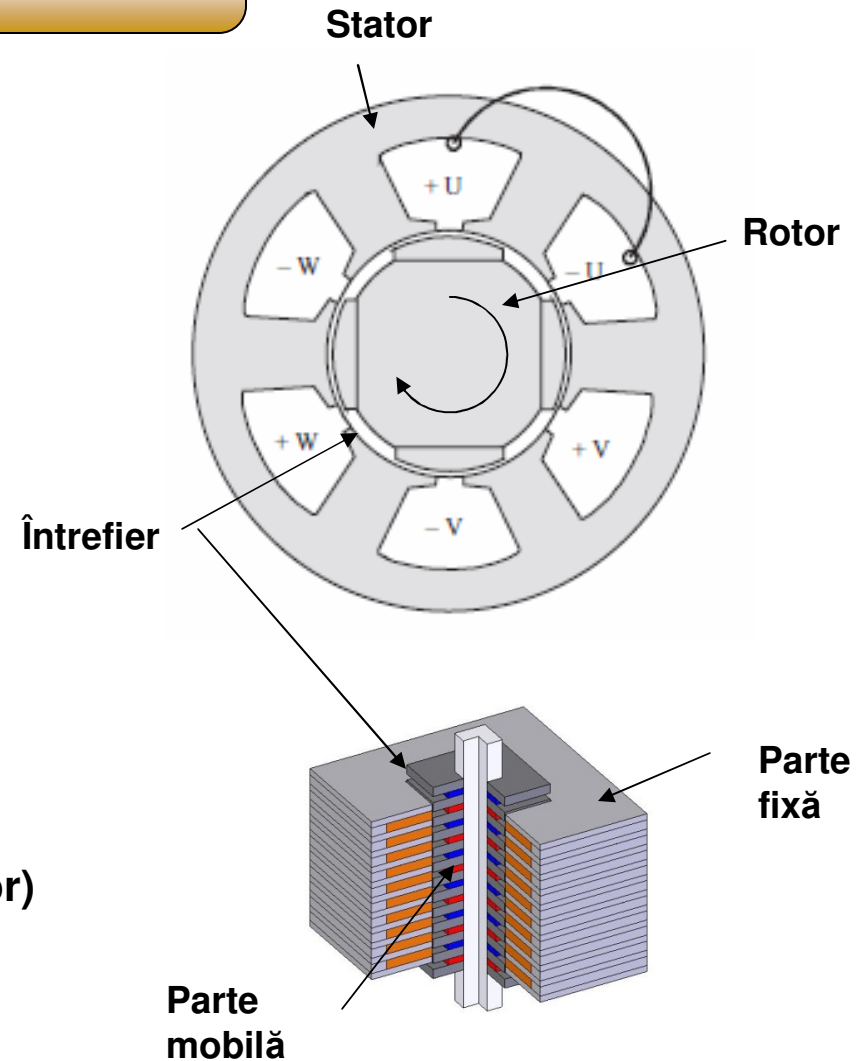
- Primar
- Secundar

➤ La mașini rotative

- Stator
- Rotor
- Întrefier

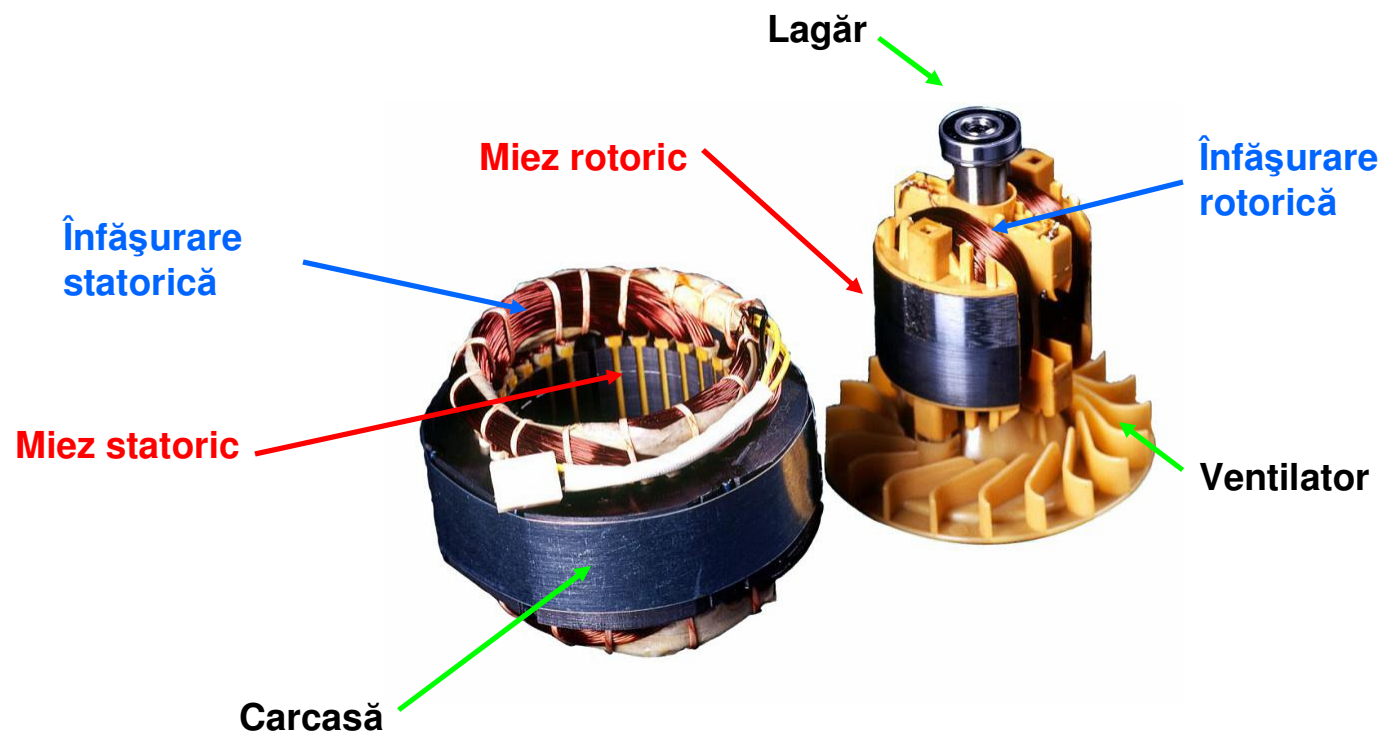
➤ La mașini liniare

- Parte fixă
- Parte mobilă (translator)
- Întrefier



❑ Din punct de vedere al rolului funcțional:

- **Subsistemul magnetic (miezuri magnetice)**
- **Subsistemul electric (înfășurări)**
- **Subsistemul mecanic și de ventilație (carcasă, lagăre, ventilator)**



Subsistemul magnetic

Rolul circuitului magnetic:

- ☐ Concentrarea liniilor de câmp
- ☐ Susținerea înfășurărilor
- ☐ Transmiterea cuplului, forțelor
- ☐ Transmiterea căldurii



Se realizează din:

- ☐ material masiv
 - Fontă sau oțel, atunci când fluxul magnetic care îl străbate este constant
 - Material feromagnetic dur cu ciclu lat de histerezis pentru mașini electrice ce funcționează pe baza fenomenului de histerezis
 - Materiale compozite pentru aplicații speciale
- ☐ tole (tablă electrotehnică), atunci când fluxul magnetic care îl străbate este variabil

Subsistemul electric

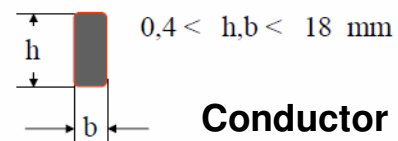
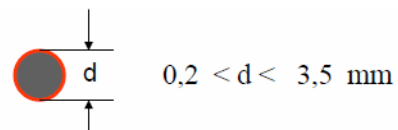
❑ Rolul sistemului electric:

- Legătura electrică cu exteriorul (sursa) și între părțile componente
- Crearea câmpului magnetic,
- Sediul t.e.m.induse – transformarea energiei

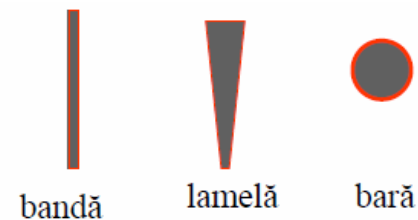
❑ Elementele sistemului electric:

- Borne
- Inele de contact, colector, perii
- Înfășurări

❑ Se realizează din cupru sau aluminiu, din conductoare, sau turnat.



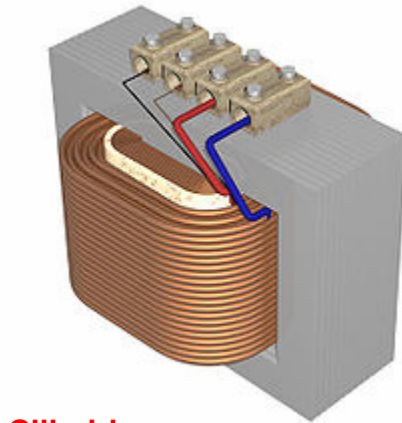
Conductor (rotund sau profilat)



Turnat

❑ La transformatoare

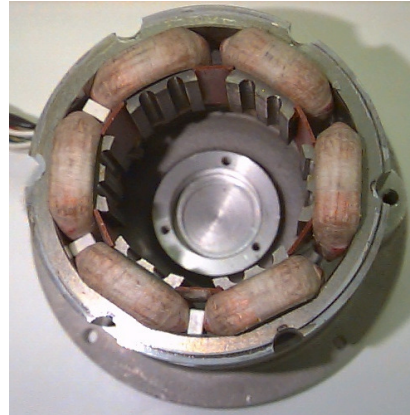
- Înfășurări în cilindru
- Înfășurări în galeți
- Înfășurări în șaibe



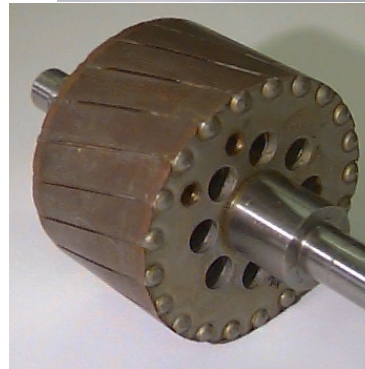
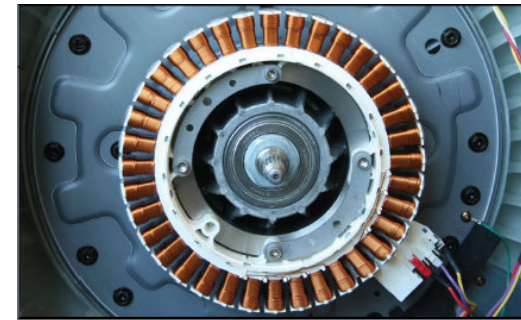
Cilindrice

❑ La mașinile electrice rotative

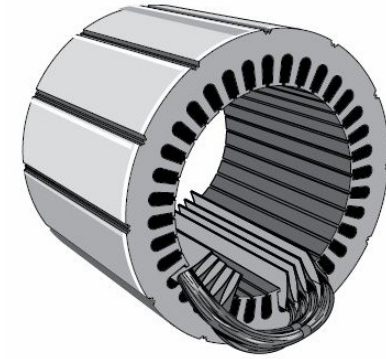
- Concentrate
- Distribuite în creștături



Concentrate



Distribuite în creștături



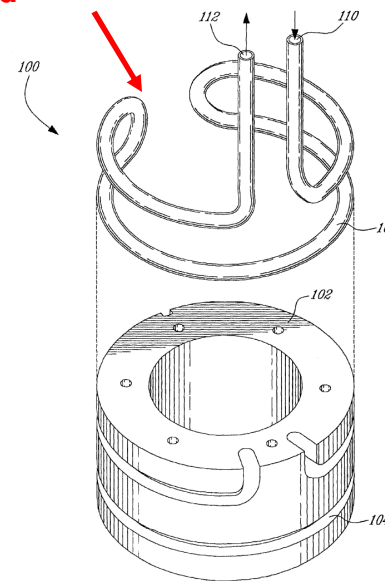
Subsistemul mecanic

Cuprinde:

- ❑ Carcasa (realizată din fontă sau oțel)
- ❑ Sistem de răcire:
 - Ventilație naturală
 - Ventilație forțată (cu aer, apă sau alt tip de lichid de răcire)
- ❑ Alte componente (lagăre, scuturi port-lagăre, etc)

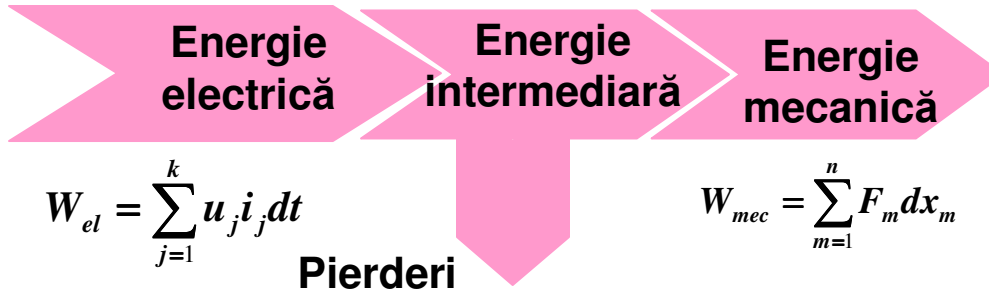


Sistem de răcire cu lichid

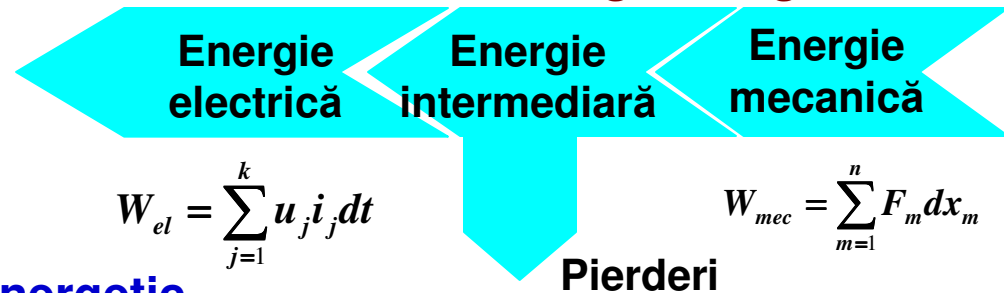


Fluxul de energie în sisteme de conversie electromecanică

Regim de motor



Regim de generator

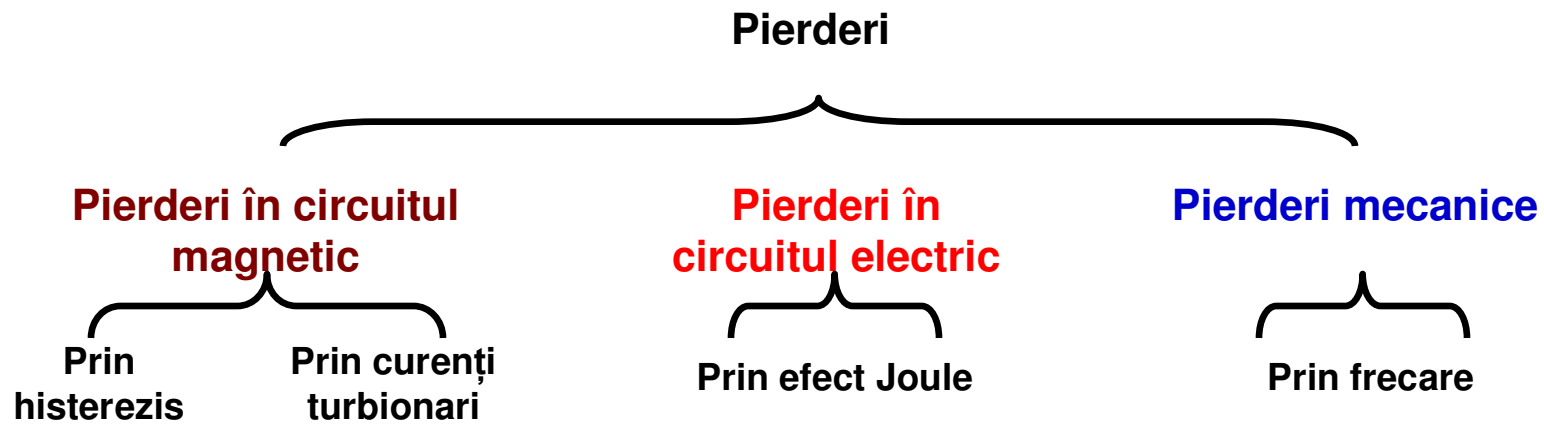


Bilanțul energetic

$$\pm dW_{el} \mp dW_{mec} = dW_{mag} + dW_{caloric}$$

Variația energiei
intermediare

Pierderile sub
formă de căldură

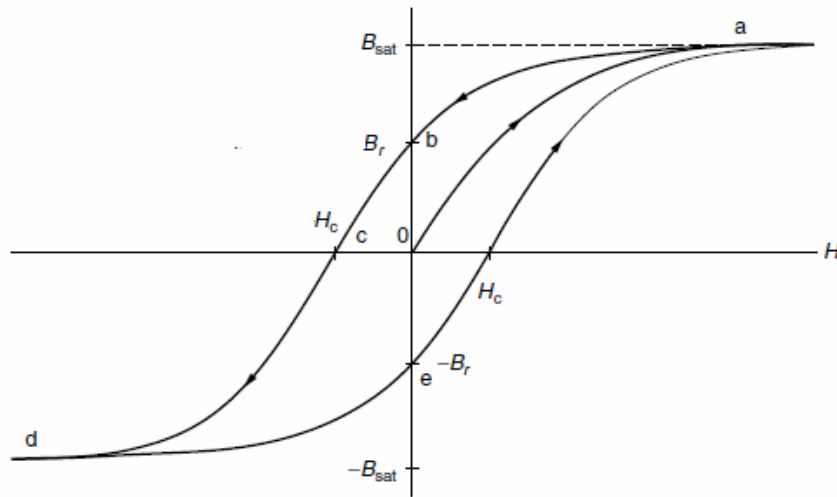


Pierderi prin efect Joule: apariția acestora are la bază efectul termic (denumit și efect Joule-Lenz), reprezentat de disiparea căldurii în conductoarele înfășurărilor parcurse de curent electric.

Legea transformării de energie în conductori(Legea Joule-Lenz)

$$p_J = \overline{EJ}$$

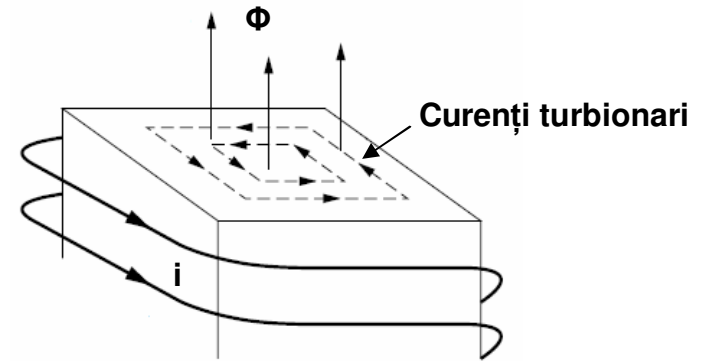
Pierderi prin histerezis



Aplicarea unei magnetizări variabile în timp asupra unui circuit magnetic realizat dintr-un material feromagnetic moale determină încălzirea miezului.

$$p_{Fe_hysterezis} = k_1 f$$

Pierderi prin curenți turbionari



Se datorează efectului legii lui Faraday, de inducție a unei tem în miezul magnetic realizat din material magnetic cu o anumită valoare a rezistivității electrice.

$$p_{Fe_crti_turb} = \frac{1}{R} [k_2 \omega \cos(\omega t)]^2$$

